УДК 550.3:553.44:622.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Д.В. Титов

Территориальное управление "ВОСТКАЗНЕДРА", г. Усть-Каменогорск
E-mail: vknedra_common@ukg.kz

На основании изучения петрофизических свойств основных рудных минералов и руд разработан комплекс скважинных и каротажных методов, обеспечивающих оперативную оценку их технологических свойств в процессе разведки месторождений. Это обеспечивает отбор представительных технологических проб и разработку на этой основе оптимальных методов переработки руд. Формирование физико-геологической технологической модели месторождения позволит сократить потери металлов на обогатительном переделе.

Анализ деятельности горно-обогатительных предприятий на Рудном Алтае показал, что наибольшие потери металлов имеют место при обогатительном переделе. При флотационном обогащении потери отдельных металлов достигают 50 % [1].

Исследованиями, выполненными в ДГП "ВНИИцветмет" (г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан) с 1990 по 2004 гг., установлено, что на протекание процессов флотации, кроме вещественных характеристик руд – минерального, химического, гранулометрического состава, текстурно-структурных особенностей и т.п., влияют электрофизические и электрохимические свойства рудных минералов и руд. При этом последние играют главенствующую роль в процессах гидрометаллургической переработки концентратов и руд.

В результате выявлено сложное распределение основных электрофизических и электрохимических характеристик рудных минералов в пределах рудных тел. Установлено, что труднообогатимые руды характеризуются:

– большим диапазоном изменения электрофизических свойств одних и тех же минералов, а, следовательно, их различными флотационными свойствами;
– наличием в рудах различных минералов со сходными электрофизическими характеристиками (например, халькопириты и сфалериты метаморфизованных руд), что обуславливает извлечение в концентраты чужеродных минералов;
– присутствием в рудах сростков минералов с резко различными электрофизическими свойствами, формирующими естественные микрогальванические элементы в потенциалообразующих средах (доступ воды, кислорода). Эти элементы работают с протеканием электрохимических реакций, что приводит к образованию вторичных минералов [2];
– присутствием в рудах, отнесенных к одному природному типу, одинаковых минералов с различными технологическими свойствами (например, халькопириты нормальных и метаморфизованных руд, сфалериты нормальные и железосодержащие).

Некоторые руды, содержащие большое количество минералов, образующих естественные гальванические элементы в связи с протеканием в активных средах электрохимических реакций, флотационным способом не обогащаются [3–5]. Их целесообразно обогащать гидрометаллургическими методами.

Анализ формирования технологических проб, отобранных на различных геологоразведочных стадиях, показал, что они отбирались без учета распределения физико-химических свойств рудных минералов в рудных телах. Поэтому большая часть таких проб оказалась не представительной. В результате проектные решения по переработке руд оказались недостаточно эффективными. Так, по результатам подсчета запасов Малеевского месторождения (1987 г.) проектировалась валовая добыча. Однако при составлении регламента на обустройство рудника с учетом электрофизических характеристик руд были выделены два технологических типа руд. С 1997 г. началась их селективная отработка, в результате существенно улучшились показатели обогащения.

Изложенные выше выводы о связи технологических свойств руд с их физико-химическими параметрами определили необходимость усовершенствования существующей геолого-технологической информационной базы.

Она должна обеспечивать:

– отображение особенностей (неоднородностей) распределения в рудных телах и залежах параметров, характеризующих ***вещественную*** (химический, минералогический, гранулометрический и петрохимический составы, текстурно-структурные особенности и т.п.) и ***физико-химическую*** (электрохимические, электрофизические, гравитационные, магнитные, радиометрические и др. свойства) ***составляющие***, определяющие процессы предварительного и флотационного обогащения, а также гидрометаллургической переработки концентратов и руд;
– преемственность при переходе на различные иерархические уровни (предварительная – детальная – промышленная – эксплуатационная разведки);
– открытость системы, допускающей пополнение, корректировку, использование новых характеристик, обеспечивающих решение частных задач.

Наиболее рациональной формой представления геолого-технологической информации, удовлетворяющей перечисленным выше требованиям, является физико-геологическая технологическая модель (ФГТМ).

Одной из основных проблем при формировании такой модели является наполнение ее информацией по физико-химическим свойствам руд.

Задача изучения физико-химических свойств руд и рудных минералов может быть решена с помощью сочетания полевых (каротажных, скважинных) и лабораторных исследований.

Метод электродных потенциалов (МЭП). В этом методе, в нашем случае, измеряется электродная разность потенциалов $\Delta U_{эп}$, возникающая на поверхности раздела сульфидов с вмещающими породами на контакте с промывочной жидкостью в скважинах. Применение метода МЭП для расчленения рудных подсечений в скважинах по электрофизическим свойствам базируется на следующих физико-геологических основах:

– дифференциация сульфидных минералов, в том числе и одноименных (например, дисульфидов железа), по величине стационарных электродных потенциалов [4];
– тесная связь коэффициентов термоЭДС сульфидов-полупроводников и их электродных потенциалов [1];

Метод ранней стадии вызванной поляризации (РСВП). Исследованиями А.П. Карасева, О.В. Бумагина, Р.С. Сейфуллина доказано, что временные характеристики РСВП рудных минералов "... представляют интерес не только с точки зрения интерпретации данных, полученных в полевых условиях. Они позволяют получить принципиально новую и объективную информацию об электрохимической активности минералов, диапазоне и характере ее изменения, косвенно отражающих условия формирования сульфидных месторождений". Этими же исследователями была установлена связь характеристик спада ранних стадий вызванной поляризации с типом проводимости сульфидных минералов. Эти

положения подтвердились при проведении РСВП в Николаевском карьере (Николаевское месторождение), вскрывшем Крещенскую рудную залежь, а также в лабораторных измерениях ранних стадий вызванной поляризации рудного керна и образцов, отобранных из горных выработок Орловского, Малеевского и Тишинского месторождений.

На рис. 1 приведено сопоставление термоЭДС пиритов пиритной матрицы, составляющей 60...80 % объема руд, и временных характеристик РСВП руд Николаевского месторождения (горизонты 197, 212). Содержание в рудах других минералов (халькопирита, сфалерита) одного порядка. Как видно из рисунка, устанавливается четкая связь между типом проводимости пиритной матрицы и временными характеристиками РСВП.

Устанавливаются четкие различия в характере спада РСВП в разных типах руд (пириты в этих рудах различаются по электрофизическим свойствам: в метаколлоидных рудах они характеризуются дырочной проводимостью, кристаллических – электронной, в переходных – смешанным типом проводимости).

Картирование руд с различными электрофизическими характеристиками пиритной матрицы (визуально они практически неразличимы) возможно с помощью профилирования методом РСВП по стволу скважин с вычислением приведенной скорости изменения потенциала вызванной поляризации на малых временах.

Контактный способ поляризационных кривых (КСПК). Этот метод основан на изучении последовательно возбужденных электрохимических реакций на поверхности рудных минералов от источника электрического тока [6].

По результатам полевых измерений методом КСПК в карьере Николаевского месторождения сделано сопоставление потенциалов катодных и анодных реакций с особенностями электрофизических свойств основных минералов.

В результате сделаны следующие выводы:

- халькопириты различаются по величине потенциала электрохимических реакций, по этому параметру в переходных рудах отмечаются две разновидности халькопиритов;
- потенциал реакций на сфалерите повышается от метаколлоидных к кристаллическим рудам, причем, как показывают геохимические исследования, в том же направлении в сфалеритах понижается концентрация железа;
- сфалериты переходных и кристаллических руд различаются по величине потенциала катодных реакций;
- галенит характеризуется во всех типах руд очень близкими значениями потенциала – от 0,75 до –0,8 В, что, по-видимому, объясняется наложением свинцовой минерализации на заключительном этапе гидротермального процесса.

Таким образом, с помощью КСПК можно оценивать минеральный состав руд и электрохимические свойства минералов и руд в естественном залегании.

Измерение термоэлектрических свойств руд. При флотации одним из основных факторов, определяющих взаимодействие минералов с реагентами, является термоЭДС минералов, определяющая знак реагента [5].

На рис. 2 приведены результаты измерения термоЭДС по горизонту 182 в карьере Николаевского месторождения, демонстрирующие возможность выделения метаколлоидных и кристаллических руд. Пириты в этих рудах составляют 50...80 %. В приведенном примере измеряемые параметры определяются свойствами пиритных матриц руд. Как отмечалось выше, они характеризуются различным типом проводимости: электронной – в кристаллических рудах и дырочной – в метаколлоидных.

Оценка геофизическими методами параметров, определяющих протекание процессов предварительного обогащения с помощью сортировок и сепараций. Основными показателями, определяющими возможности физических методов сортировок и сепараций, являются:

- контрастность распределения металлов;
- корреляционная связь физических разделительных критериев с содержанием полезных компонентов.

При оценке контрастности распределения полезных компонентов по керну скважин и по результатам опробования горных выработок используются линейные эквиваленты, предложенные Л.Ч. Пухальским [7].

Для оценки петрофизических свойств, определяющих протекание процессов предварительного обогащения, используются данные рентгенорадиометрического каротажа (РРК), метода скользящих контактов (МСК) и МЭП. По методам МСК и МЭП выделяются интервалы с серноколчеданной и с вкрапленной минерализацией. По методу РРК определяются содержания меди, свинца, цинка в рудных интервалах.

В случае применения в качестве разделительного критерия плотности руд используют методы плотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-П), РРК и МСК. Изучение характера распределения полезных компонентов в пределах выделенных разновидностей по плотности пород выполняется с помощью РРК. В совокупности эта информация позволяет выделить такие мешающие гравитационному обогащению факторы, как наличие в рудных телах даек основного состава, плотность которых соизмерима с плотностью руд.

При использовании в качестве разделительного критерия электрического сопротивления (радиорезонансный метод сепарации) применяют методы электрического каротажа: МСК, каротажа сопротивлений (КС), индукционного каротажа. На рис. 3 приведены геоэлектрические разрезы по из-

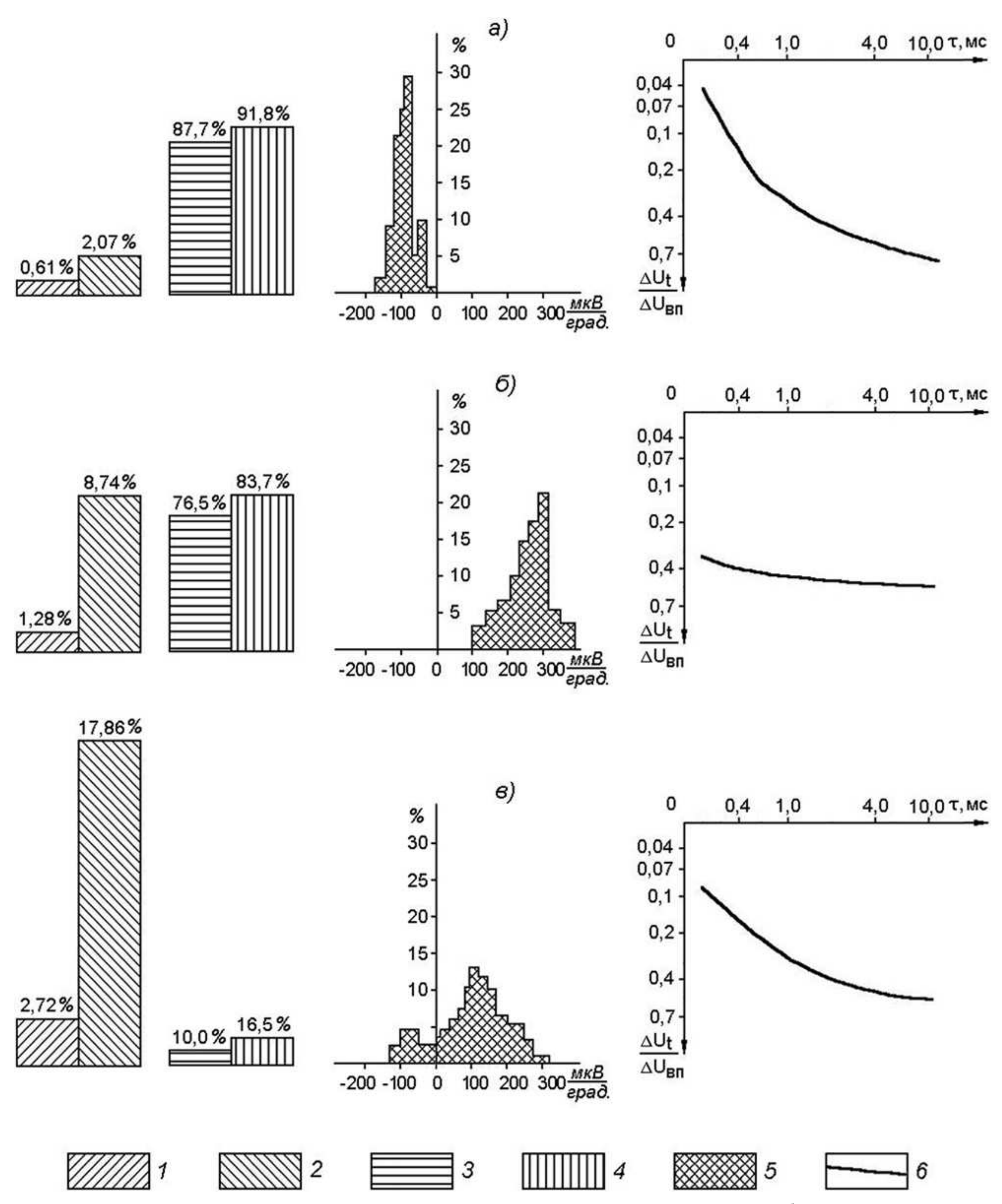


Рис. 1. *Технологические свойства руд с пиритной матрицей различного типа проводимости: а, б, в – руды с матрицей, характеризующейся электронным (а), дырочным (б) и смешанным (в) типом проводимости; 1) содержание меди и 2) цинка в исходной руде, 3) извлечение меди и 4) цинка в концентрат, 5) гистограммы термоЭДС пиритов, 6) график зависимости РСВП* $\frac{\Delta U_t(\tau)}{\Delta U_{\text{вп}}}$ *от типа проводимости пиритной матрицы*

мерениям, проведенным во взрывных скважинах на горизонте 182 Николаевского карьера с помощью индукционного каротажа. Оценка в пределах каждой из выделенных зон с помощью метода РРК содержаний металлов позволяет определить коэффициент контрастности распределения полезных компонентов с учетом дифференциации рудных зон по проводимости.

При выделении руд, обогащенных негативно влияющими на протекание процессов флотации магнитными минералами (пирротин, мельниковит, мельниковит-пирит, железосодержащий сфалерит), целесообразно использовать каротаж магнитной восприимчивости (КМВ) и каппаметрию в горных выработках.

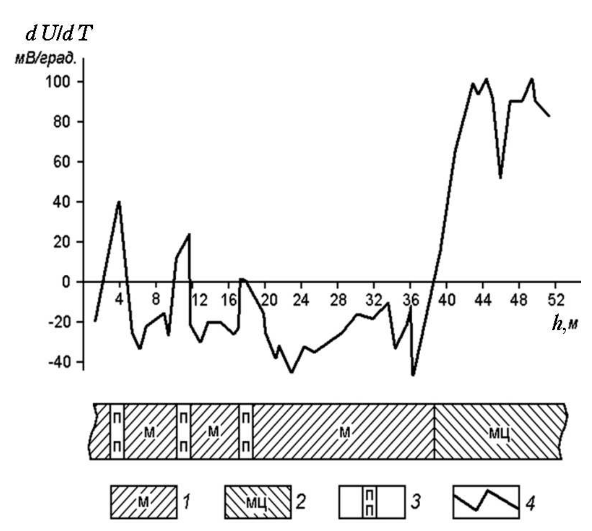


Рис. 2. *Результаты измерений термоЭДС на Николаевском руднике в карьере по горизонту 182 (по П.С. Ревякину): 1) кристаллические медно-колчеданные руды; 2) метаколлоидные медно-цинковые руды; 3) прожилки барит-полиметаллических руд; 4) графики термоЭДС*

На Николаевском месторождении установлено, что железосодержащие сфалериты метаколлоидных руд характеризуются повышенной магнитной восприимчивостью (до $500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ).

На рис. 4 показан пример картирования с помощью каппаметрического метода метаморфизованных медно-цинковых руд в зоне контакта их с дайками на Малеевском месторождении.

На основании изложенного разработан комплекс геофизических исследований скважин (ГИС), решающий задачи изучения вещественного состава и технологических свойств руд колчеданно-полиметаллических месторождений. При этом комплекс ГИС рассматривается как единая система геофизических исследований скважин, поверхности и горных выработок, включающая в себя:

– набор скважинных и каротажных методов, необходимых для изучения природных и технологических типов руд;
– технологию проведения ГИС: масштабы, этапность исследований;
– методику интерпретации ГИС.

Набор методов ГИС на поисково-оценочной и разведочной стадиях подразделяется на группы:

Первая включает метод заряженного тела, измерения в скважинах ЕП, КС, РРК. Масштаб исследований методом заряженного тела 1:5000 – 1:10000, методом КС и РРК – 1:500. Общая задача – выделение и уточнение местоположения рудных интервалов, картирование рудовмещающих структур. Этими методами охватываются все скважины. На основании полученных данных строится частная петрофизическая модель первого приближения, которая используется для предварительной количественной интерпретации метода заряда.

Вторая представлена методами, обеспечивающими увязку рудных интервалов, определение зон выклинивания, оконтуривание околоскважинного и межскважинного пространства – МЭК и РВП. Масштаб 1:1000. По этим данным уточняется петрофизическая модель первого приближения, она используется для обсчета следующих вариантов при интерпретации метода заряда. Корректировка петрофизической модели производится в динамическом режиме по мере выполнения исследований методами МЭК и РВП.

Третья обеспечивает оценку вещественного состава, содержаний полезных компонентов, текстурно-структурных особенностей руд в выделенных интервалах – РРК, МСК, МЭП, телефотометрия. Измерения проводятся в масштабах 1:500 – 1:50. Рекомендуется проведение измерений методом КСПК. В этом случае может быть получена информация по минеральному составу руд, электрофизическим свойствам слагающих их рудных минералов, а также могут быть выполнены предварительные оценки запасов полезных компонентов. По полученным данным составляется модель распределения природных типов руд.

Четвертая оценивает физико-химические свойства, определяющие протекание процессов флотации, гидрометаллургической переработки и методов предобогащения на основе сортировок и сепараций. Эти измерения проводятся в пределах выделенных природных типов руд. Для изучения электрофизических (электрохимических) свойств руд выполняются поточечные измерения методом РСВП или методом измерения термоЭДС. При благоприятных условиях (pH бурового раствора, дифференциация рудных минералов по термоЭДС) эти методы заменяются каротажным методом МЭП. Масштаб записи кривых 1:50 – 1:100.

Дополнительные методы при оценке параметров, обуславливающих протекание процессов предварительного обогащения с помощью сортировок и сепараций, определяются выбранным разделительным критерием.

Таким образом, с помощью геофизических методов, помимо решения традиционных задач – геометризации рудных тел и определения содержаний полезных компонентов, можно решать задачи технологического картирования. На стадии разведки можно объективно оценить эффективность флотационного обогащения руд, гидрометаллургической переработки концентратов, а также методов предварительного обогащения.

Применение современных компьютерных технологий по обработке результатов измерений и объемному районированию установленных параметров позволят формировать и модифицировать физико-геологическую технологическую модель в динамическом режиме по мере накопления информации [8]. Это обеспечит объемное картирование руд в пределах рудных тел и залежей по природным и тех-

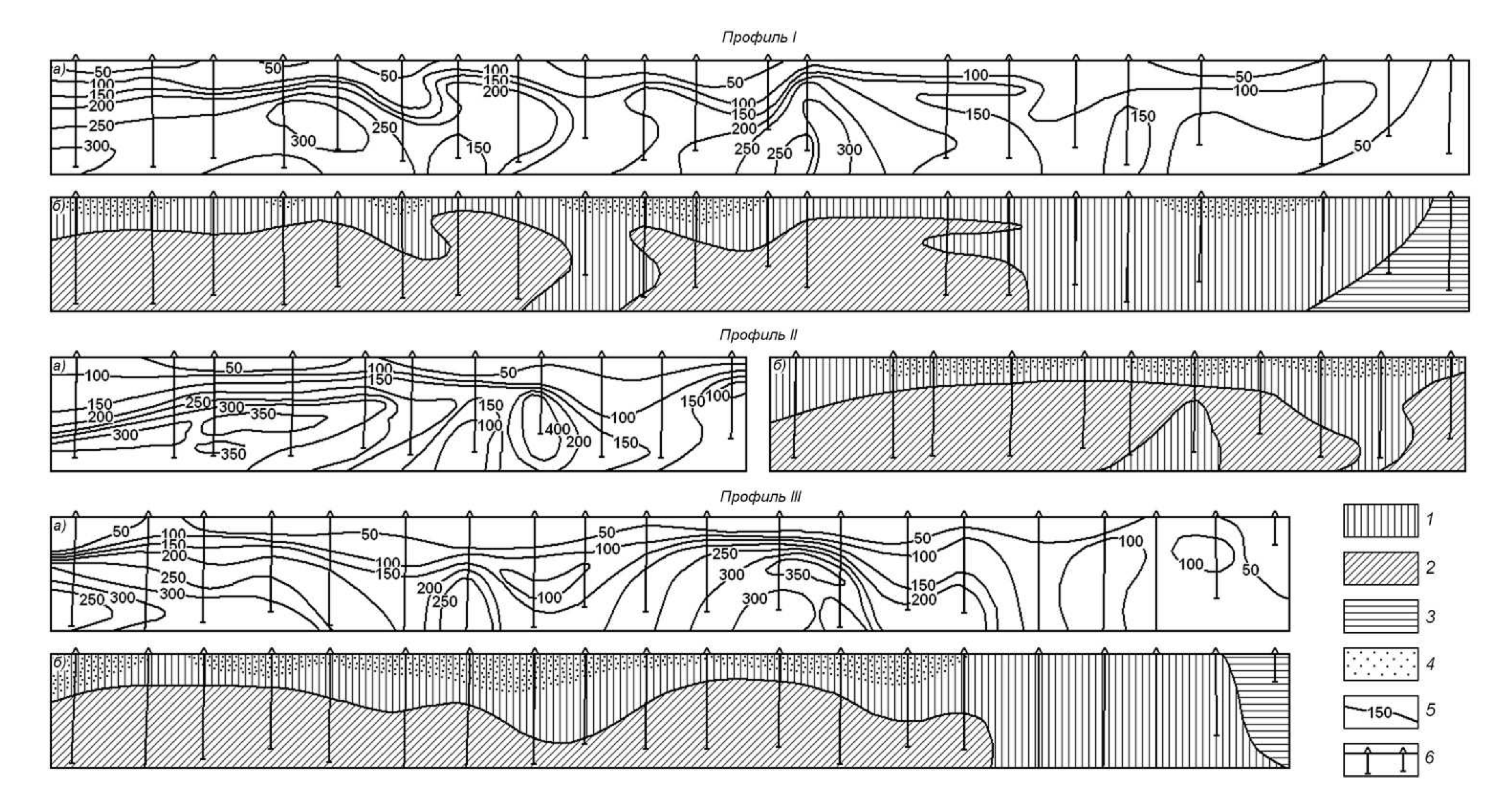


Рис. 3. *Результаты индукционного каротажа взрывных скважин (горизонт 182, блок 7р): 1) метаколлоидные цинковые руды; 2) переходные медно-цинковые руды; 3) вмещающие минерализованные породы; 4) область дезинтеграции руд; 5) изолинии E – значений радиорезонансного эффекта; 6) взрывные скважины*

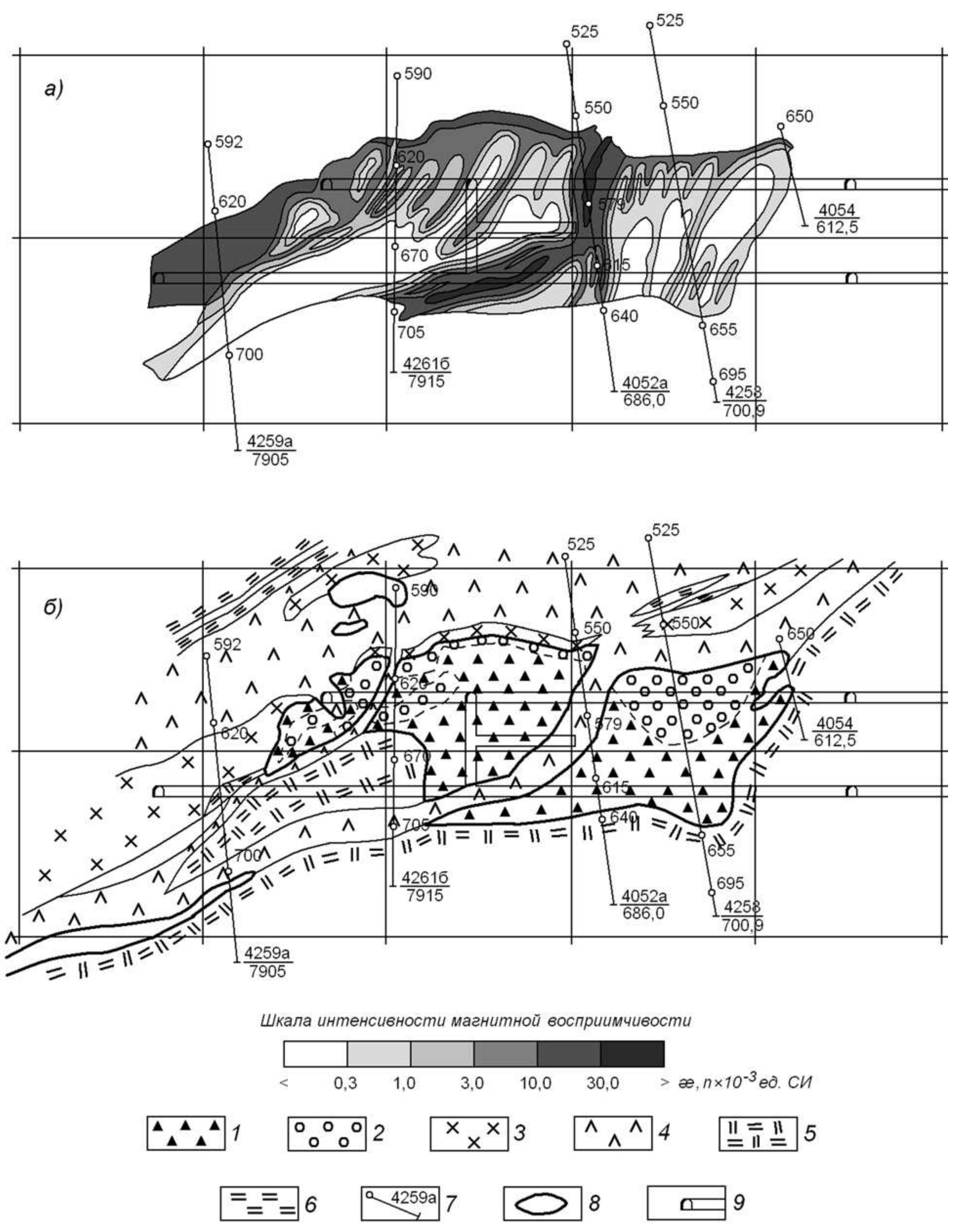


Рис. 4. *Магнитные свойства руд Малеевского месторождения: а – распределение магнитной восприимчивости; б – геологический разрез по профилю 190; 1–2) руды: медно-цинковые (1), полиметаллические (2); 3–6) вмещающие породы: кварцевые порфиры (3), порфириты основного состава (4), кварциты (5), алевролиты (6); 7) проекции разведочных скважин; 8) контуры рудных тел; 9) горные выработки*

нологическим свойствам. Будет решена задача отбора представительных технологических проб и, соответственно, разработки оптимальных технологий обогащения колчеданно-полиметаллических руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов Д.В., Борцов В.Д., Генкин Ю.Б., Селезнев Ю.Л. Проблема освоения разведанных запасов колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Минерально-сырьевые ресурсы и устойчивое развитие Казахстана: Матер. Республ. научно-практ. конф. – Кокшетау, 1998. – С. 100–102.
2. Борцов В.Д., Кушакова Л.Б., Ложников С.С. Естественные гальванические элементы в рудах полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Цветные металлы. – 2004. – № 6. – С. 11–14.
3. Генкин Ю.Б., Борцов В.Д. Роль естественных гальванических элементов в процессах обогащения сульфидных руд // Сб. научных трудов ВНИИцветмета. – Усть-Каменогорск, 2001. – С. 86–90.
4. Свешников Г.Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. – 160 с.
5. Плаксин И.Н., Шафеев Р.Ш. Некоторые вопросы теории селективного выщелачивания соединений, обладающих полупроводниковыми свойствами // В кн.: И.Н. Плаксин. Избранные труды. Гидрометаллургия / Под ред. И.Н. Плаксина. – М.: Наука, 1972.
6. Рысс Ю.С. Геоэлектрохимические методы разведки. – Л.: Недра, 1965. – 250 с.
7. Пухальский Л.И. Рудничная геофизика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 191 с.
8. Титов Д.В., Борцов В.Д., Наумов В.П., Филатов А.С. Физико-геологические модели как основа современных информационных технологий // Современные информационные технологии в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях: Матер. Междунар. научной конф. – Усть-Каменогорск, 2006. – С. 74–76.

УДК 553.94:552.08:519.233.5